

一种自适应毫米波被动成像的超分辨率算法

陈友仙 聂建英

(福州大学数学与计算机科学学院, 福建 福州 350108)

摘要 针对目前毫米波被动成像的图像分辨率很低的问题,提出了一种新的有效的超分辨率算法。通过改进维纳滤波方法,对毫米波图像进行低频分量恢复,将得到的低频分量代替通带内频谱分量,充分利用了图像中的信息,使之具有自适应功能。将改进的维纳滤波的优点和正则最大实验概率(MAP)超分辨率算法外推高频分量的优点相结合,通过正则 MAP 算法迭代获得外推高频分量,对图像的傅里叶变换作频域校正,再求图像的逆变换,对其作进一步校正,逐次进行上述过程,直到达到提高图像的分辨率的目的。对提出新的自适应超分辨率算法进行了多次实验验证。结果表明,提出的新算法能够增强图像的分辨率,收敛速度快,峰值信噪比高,并且视觉效果优越于维纳滤波和正则 MAP 算法。实验结果证明了所提出方法的有效性。

关键词 图像处理;超分辨率算法;自适应算法;维纳滤波;无源毫米波成像

中图分类号 TN015 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.111004

An Adaptive Super-Resolution Algorithm for Passive Millimeter-Wave Imaging

Chen Youxian Nie Jianying

(College of Mathematics and Computer Science, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract To solve the problem that the resolution of the millimeter-wave passive imaging is low, a new effective super-resolution algorithm is proposed. Wiener filtering algorithm is improved, and the low-frequency components are restored. The low-frequency components of instead of the pass-band with spectrum component is put to making full use of the information in the image and make it self-adaptive. Then the adaptive Wiener filtering and regular maximum a posteriori (MAP) super-resolution algorithm which can extrapolate high-frequency component are combined. The regular MAP iterative algorithm is used to obtain extrapolated high-frequency components, the frequency domain correction is conducted for Fourier transform of the image, and inverse transform of the image is carried out for further correction, the above process is performed successively until the resolution of the image is improved. The new adaptive super-resolution algorithm is tested through the simulation experiments. The simulation results show that the new algorithm can enhance the resolution, improve the peak value signal-to-noise ratio and has fast convergence. The visual effect is superior to the other two algorithms; which indicate that the new algorithm is effective.

Key words image processing; super-resolution algorithm; adaptive algorithm; Wiener filter; passive millimeter-wave imaging

OCIS codes 100.6640; 110.1085; 170.3010

1 引言

毫米波(MMV)具有穿透雾、雨、烟尘以及在较为恶劣的气候环境下正常工作、全天候工作等特点,广泛应用于军事、安检和交通等许多领域。毫米波成像在安检、飞机降落和防撞系统等方面也正渐起着越来越重

收稿日期: 2012-06-06; **收到修改稿日期**: 2012-08-08; **网络出版日期**: 2012-08-30

基金项目: 江苏省资源环境信息工程重点实验室基金(JS201104)和国防重点预研项目(51305050204)资助课题。

作者简介: 陈友仙(1987—),男,硕士研究生,主要研究毫米波探测、信号处理与目标识别等方面的研究。

E-mail: chenyx328@163.com

导师简介: 聂建英(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事毫米波探测、信号处理与目标识别等方面的研究。

E-mail: neijy@fzu.edu.cn

要的作用^[1,2]。

毫米波成像系统可分为主动和被动两种模式^[3]。被动毫米波成像系统是利用目标物体与环境的自辐射温度差异成像的。由于不同的物体辐射的温度能量不同,因此毫米波被动探测器通过接收不同物体的辐射能量差异加以区别实现成像。由于探测器系统的天线孔径有限,其传递函数等效为一个低通滤波器(在衍射受限截止频率之外的频谱为零),因而系统的成像分辨率较低,高频分量丢失比较严重,成像受噪声影响较严重,得到的图像很模糊。为提高图像分辨率,需要采用图像恢复或超分辨率算法^[4]。超分辨率技术是利用关于同一场景的有亚像素位移含冗余信息的降质低分辨率图像序列来重建出高分辨率质量图像技术^[5]。

为提高成像的质量,可以从两个方面考虑:1)增大天线孔径提高工作频率,但这受限于目前的技术与加工工艺水平条件;2)通过研究各种算法从低分辨率(LR)图像中以重构出更高分辨率(HR)图像,称其为超分辨率(SR)图像恢复或重构^[6]。因此通过研究各种算法来实现从低分辨率的图像中获取高分辨率图像目前成为毫米波被动探测与成像研究中的热点之一。对于毫米波被动成像,超分辨在此包含两层含义:一是恢复通带内的频谱分量,二是外推衍射截止频率之外的频谱,既高频分量^[7]。

目前,用于毫米波被动成像研究的超分辨算法主要有:凸集投影(POCS)算法^[8]、最大似然算法(例如 Lucy-Richardson 算法)、期望最大化(EM)方法、最大后验(MAP)算法^[9](例如泊松最大后验算法^[10])和凸集投影最大似然(POSC-ML)算法等。这些算法都涉及到对图像先验信息的建模问题。因此,如果建模不准确,其估计的误差将被放大。

为了能够更好的改善图像的恢复能力,结合了改进的维纳滤波和自适应正则 MAP 算法相,提出一种新的有效的超分辨率算法。在每次的正则 MAP 迭代前,先进行改进的维纳滤波进行恢复频谱分量,使得在外推高频分量的同时,能够很好的保护通带内的低频分量不被破坏。最终达到提高分辨率的目的,并且得到的效果比单独的使用维纳滤波和正则 MAP 的效果更好。

2 毫米波被动成像数学机理

被动毫米波成像是把接收到的信号转换成数字信号,然后进行图像恢复处理。其过程可以简化等效为一个空间滤波器和一个加法器级联的模型,模型简化如图 1 所示。图 1 中连续函数 $g(x,y)$ 为输出图像的亮温分布, $f(x,y)$ 为目标或场景的亮温分布连续函数,即实际的被动毫米波探测图像; $h(x,y)$ 为成像的点扩展函数(PSF),即空间滤波器的二维冲激响应函数,反映了成像系统的参数和性能; $n(x,y)$ 为由成像系统的噪声。被动毫米波成像系统的数学机理可表示为

$$g(x,y) = h(x,y) * f(x,y) + n(x,y), \quad (1)$$

式中“*”为二维卷积运算。

对于毫米波被动成像,超分辨在此包含两层含义:1)恢复通带内的频谱分量,2)外推衍射截止频率之外的频谱,既高频分量。超分辨率恢复的任务就是从低分辨率图像中尽可能的恢复逼近理想的图像。

于是对(1)式两边作傅里叶变换就得到毫米波被动成像相应的频域数学表达式,即

$$G(u,v) = H(u,y)F(u,v) + H(u,v), \quad (2)$$

式中 $G(u,v)$, $H(u,v)$, $F(u,v)$, $N(u,v)$ 分别为 $g(x,y)$, $h(x,y)$, $f(x,y)$, $n(x,y)$ 的傅里叶变换。

3 改进的维纳滤波与正则 MAP 算法

3.1 自适应的维纳滤波图复原算法

维纳滤波算法的思想是把图像信号看成平稳随机过程,是一种简单的频域恢复方法,能够很好地恢复通带内的频谱分量。维纳滤波器的估计公式为

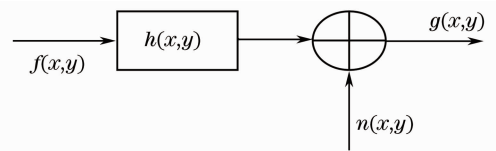


图 1 被动毫米波成像数学机理

Fig. 1 Mathematical mechanism of passive millimeter wave imaging

$$F_w = \left[\frac{|H(u,v)|^*}{|H(u,v)|^2 + \gamma \frac{S_n(u,v)}{S_f(u,v)}} \right] G(u,v), \quad (3)$$

式中 $H^*(u,v)$ 为 $H(u,v)$ 的共轭, r 为一个正常数, $S_n(u,v)$ 和 $S_f(u,v)$ 分别为噪声和原始图像的功率谱 $S_n(u,v)/S_f(u,v)$ 起到了规则化参数的作用。

但在实际应用中,由于真实图像的 $S_n(u,v)$ 和 $S_f(u,v)$ 常常很难获得,故常用复原的滤波器为

$$F_w = \left[\frac{|H(u,v)|^*}{|H(u,v)|^2 + K} \right] G(u,v), \quad (4)$$

式中 K 为根据经验值预先设定的常数。

由于维纳滤波在实际应用时,(4)式中的 K 值是根据经验值来选取的一个常数,与真实图像信比之间会存在一定的误差,然而在图像重建中经常会出现多次迭代,而 K 值往往在不同的迭代中取的值不一样,若将 K 值固定,有时候还会起到反作用。因此若能将 K 根据每次迭代的不同信息自适应,将会取得很好的效果。

为体现图像复原过程中方差的变化,同时考虑到图像的局部信息,用退化图像的局部噪声方差 δ_n^2 与局部图像方差 δ_g^2 之比代替 K 值,这就形成一个能随着图像的局部方差的变化而自动变化的参数。在退化图像的局部噪声方差大,而图像局部方差小处,取一个较大的值作为参数可以加强平滑,抑制噪声。而在局部噪声方差小,图像局部方差大处取一个较小的参数 K ,可以弱化,保持图像的细节。灵活地对退化后的图像进行区别处理,从而达到良好的图像恢复效果,使得维纳滤波具有了自适应的功能。

K 的详细算法^[11]:

- 1) 令均匀算子 $z = \text{one}(3) / 9$, $\text{one}(n)$ 指 $n \times n$ 单位矩阵,与退化图像 f_k 进行卷积,得 $z_0 = g * z$;
- 2) 计算卷积后图像 z_0 的方差 $\delta_{z_0}^2$ 和退化图像 f_k 的方差 $\delta_{f_k}^2$;
- 3) 估计退化图像局部噪声的方差值 $\delta_n^2 = \delta_{f_k}^2 - \delta_{z_0}^2$ 。计算自适应参数

$$K = \frac{\delta_n^2}{\delta_g^2} = \frac{\delta_{f_k}^2 - \delta_{z_0}^2}{\delta_g^2}. \quad (5)$$

综合以上的可得,维纳滤波器的公式最终可表示为

$$F_w^k = \left[\frac{|H(u,v)|^*}{|H(u,v)|^2 + \frac{\delta_{f_k}^2 - \delta_{z_0}^2}{\delta_{f_k}^2}} \right] G(u,v). \quad (6)$$

在实际的无源毫米波图像中,不同空域频谱分量受噪声的污染是不同的。在无源毫米波成像系统截止频率之内,获取图像的低频分量受噪声的污染相对小些,信噪比高;高频分量中包含了更多的噪声分量,信噪比低。而在成像系统截止频率之外,基本上只有噪声分量存在。由此可知,维纳滤波复原算法能够比较好地恢复无源毫米波图像通带内的频谱分量,滤除成像系统截止频率之外的频谱分量。

3.2 正则 MAP 重构基本原理

MAP 估计算法是一种广泛使用的统计重建方法,它把超分辨率图像重建问题看成一个统计估计问题^[12]。用正则 MAP 方法来估计图 1 模型中的 f 就是使后验概率 $P\{f|g\}$ 的值最大,即

$$\hat{f}_{\text{MAP}} = \arg \max[P\{f|g\}], \quad (7)$$

(7)式可以通过

$$\hat{f}_{\text{MAP}} = \arg \min[\|g - h * f\|^2 + \mu \|qf\|^2], \quad (8)$$

实现式中 μ 为正则化参数, h 为 PSF, q 为一线性高通滤波算子,文中选择的二维拉普拉斯算子为

$$\frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial y^2} = f(x+1,y) + f(x-1,y) + f(x,y+1) + f(x,y-1) - 4f(x,y).$$

由于 MAP 方法仍然具有病态性,所以必须在 MAP 方法中引入正则化方法。正则化参数求解公式为^[13]

$$\mu_{k+1} = \ln \left(\lambda \frac{\|g - hf_k\|^2}{\|qf_k\|^2 + r} + 1 \right), \quad (8)$$

式中 λ 为收敛修正因子,可选一个固定常数,这里取 $\lambda = 0.0001$ 。 r 为一个很小的数,用于保证分母不为零;

结合正则化参数,利用梯度最优化方法求解(5)式,可得到递归式

$$f_{k+1} = f_k + [h^T g - (h^T h + \mu_{k+1} q^T q) f_k], \quad (10)$$

经过傅里叶变换得

$$F_{k+1} = F_k + [H^T G - (H^T H + \mu_{k+1} Q^T Q) F_k], \quad (11)$$

式中 F_{k+1} 、 F_k 、 H 、 G 和 Q 分别为 f_{k+1} 、 f_k 、 h 、 g 和 q 的傅里叶变换。

4 一种新的自适应超分辨率方法

结合将正则 MAP 算法和改进的维纳滤波算法的优点,提出了一种新的自适应超分辨率算法。首先,用改进的维纳滤波对毫米波图像进行低频分量恢复,将得到的低频分量代替通带内频谱分量;然后,通过正则 MAP 算法迭代获得外推高频分量;对图像的傅里叶变换作频域校正,再求图像的逆傅里叶变换,然后对其作进一步校正;逐次进行上述过程,直到达到提高图像的分辨率的目的。

算法具体流程图如图 2 所示,该算法主要通过以下步骤来完成:

1) 设初始值 $f_0 = g$ (g 为获取的退化图像),用(5)式计算维纳滤波恢复频谱 F_w^k ,实现(11)式迭代过程,得到傅里叶变换 F_{k+1} ;

2) 实现频域校正方法

$$F_k = \mu H F_w^k + (1 - \mu H) F_{k+1},$$

式中 μ 为正则化参数, H 为 h 的傅里叶变换;

3) 对得到的新的频域 F_k 作逆 FFT 变换(IFFT)得到恢复图像 f_k ;

4) 对 f_k 进一步修正,

$$f_k = (f_k - f_{\min})D / (f_{\max} - f_{\min}),$$

式中 f_{\max} 和 f_{\min} 分别是 f_k 中的最大值和最小值, $D=255$;

5) 继续迭代,当满足以下的迭代条件,

$$\|f_{k+1} - f_k\|^2 / \|f_k\|^2 \leq d,$$

式中 $d=0.000001$,终止迭代。

5 仿真与实验分析

为验证文中提出的方法的有效性,将本文所提的方法、维纳滤波和正则化 MAP 方法这 3 种方法用于被动毫米波成像的恢复,并对它们的结果进行比较。采用了如下的实验来验证。

5.1 实验一

模拟无源毫米波图像。根据无源毫米波成像机理,将飞机图像模拟生成被动毫米波图像。峰值信噪比 (PSNR) 是衡量图像质量的一项重要指标,其值越大说明恢复的图像质量越好,定义为

$$r_{\text{PSN}} = 10 \ln \frac{mm \max |f(i,j)|^2}{\sum_{i,j} [f(i,j) - \hat{f}(i,j)]^2},$$

式中 mm 为图像总像素数, $f(i,j)$ 和 $\hat{f}(i,j)$ 分别为模拟毫米波图像和复原后的处理图像。

实验中系统的空间频域特性 h ,即点扩展函数,为 10×10 方差为 2 的二维高斯函数,高斯白噪声 n 是均值为 0,方差为 0.5,其中维纳滤波 $K=0.1$ 。如图 3 为三种方法合成像结果,经过退化后得退化图像的 $r_{\text{PSN}} =$

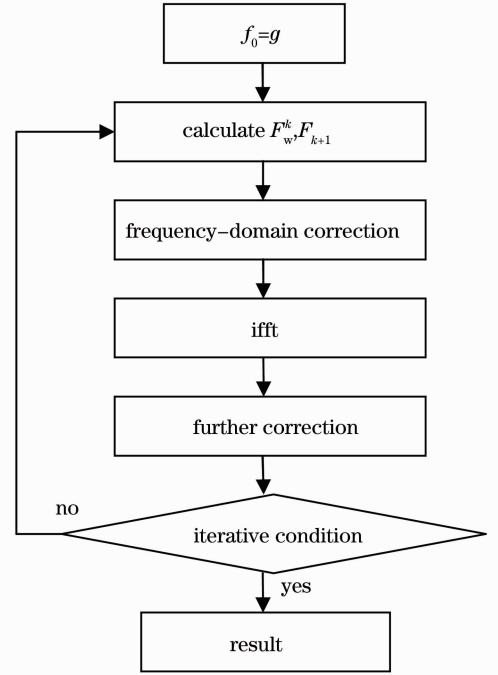


图 2 算法流程

Fig. 2 Flow chart of algorithm

17.7545,采用维纳滤波($K=0.1$)和正则 MAP 方法恢复后的结果分别是 26.6775 和 31.1848,而论文的方法处理后 $r_{\text{PSN}}=35.5848$,迭代次数只用了 8 次就达到了收敛的条件。比较 3 种方法恢复的图像,论文提出的方法不仅提高了 r_{PSN} ,也改善了视觉效果。

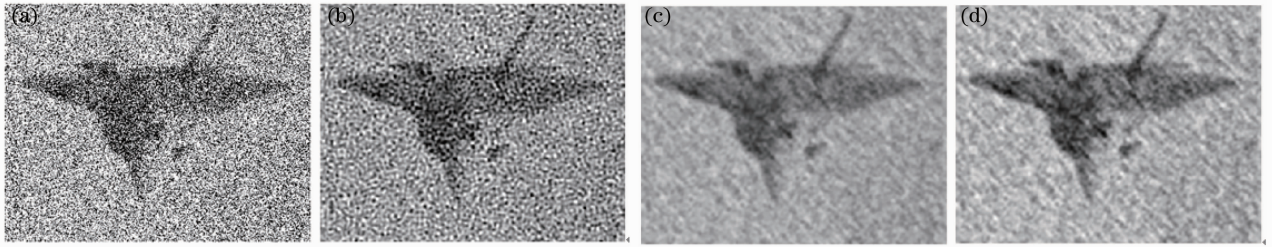


图 3 三种方法的成像结果。(a) MMV 图像;(b)接纳滤波恢复图;(c) MAP 恢复图;(d)本文所提方法恢复图
Fig. 3 Imaging results of three methods. (a) MMV imaging; (b) restored image by Wiener filtering; (c) restored image by MAP; (d) restored image by the method of this paper

图 4 为三种方法的频谱图。由图 4 可知,可以看出退化后的图像它的频谱的情况,经过了正则自适应 MAP 算法的处理,图像频谱得到了较好的外推扩展;而经过论文提出的新方法处理后,图像频谱也得到了很好的外推,并且效果更优于正则自适应 MAP 算法。

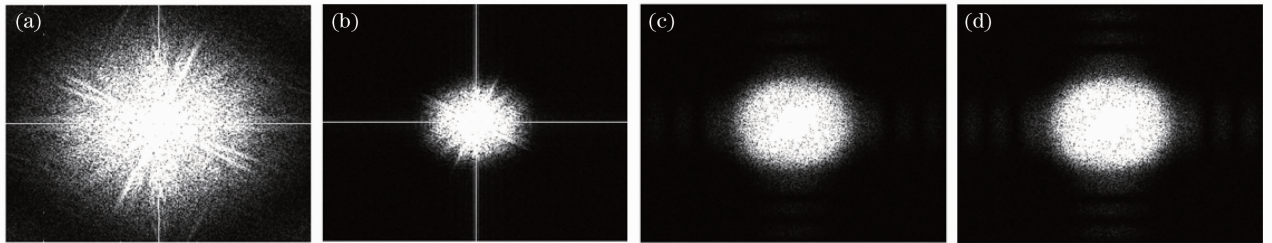


图 4 不同方法成像的频谱图。(a)原始频谱;(b)退化频谱;(c) MAP 频谱;(d)本文频谱
Fig. 4 Frequency spectrum by different methods. (a) Original spectrum; (b) degraded spectrum; (c) MAP spectrum; (d) spectrum in this paper

5.2 实验二

为了进一步的说明论文方法对不同被动毫米波图像恢复的有效性,论文对不同方差的高斯白噪声下的做实验进行比较。实验二取 PSF 为 10×10 方差为 2 的二维高斯函数,高斯白噪声 n 均值为 0,方差为 0.05,实验结果如图 5 所示。由图 5 可知,经过论文方法处理后的图像去噪效果明显,效果更加清晰,整体视觉效果比正则 MAP 方法更好。图 6 为图 5 对应的频谱图,由图 6 可知,两种算法均有一定的频谱外推能力,而本文算法的频谱外推能力更接近原始图像的频谱。

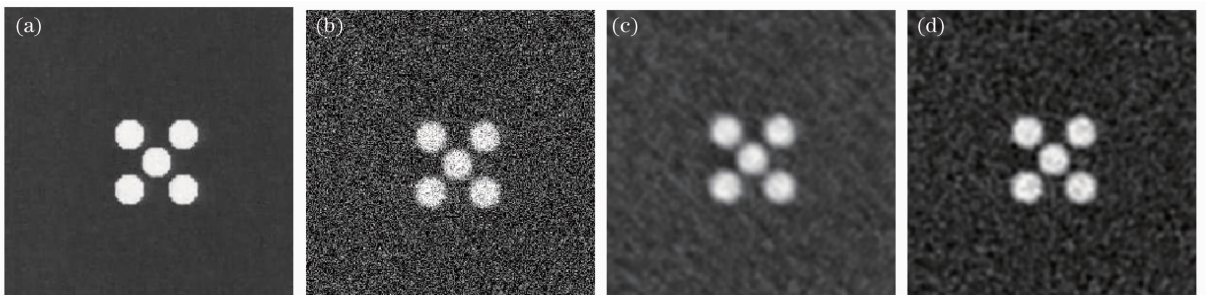


图 5 实验二图像。(a)原始图像;(b) MMV 模拟图;(c) MAP 恢复图;(d)本文恢复图
Fig. 5 Image of Experiment two. (a) Original image; (b) simulated MMV imaging; (c) restored image by MAP; (d) restored image by the method in this paper

5.3 实验三

由实验一和实验二的结果可知,本文算法是一种有效性的毫米波图像恢复算法,实验三是为了证明算法

的在不同图片、不同方差噪声下的有效性。表 1 数据为 5 次实验的平均值,测试图像的分别是飞机、坦克和汽车生成的模拟毫米波图像,方差如表中所示(其中 Degraded 表示退化图像,Wiener 表示维纳滤波,MAP 表示正则 MAP,Article 表示论文方法)。根据表中的实验数据分析可知,论文方法处理图像得到的 r_{PSNR} 值优于维纳滤波($K=0.1$)和正则 MAP 方法,并且在一定范围内,当随着高斯白噪声的方差越大论文方法的相对效果越好。说明了其性能和效果优于维纳滤波和正则 MAP 算法。

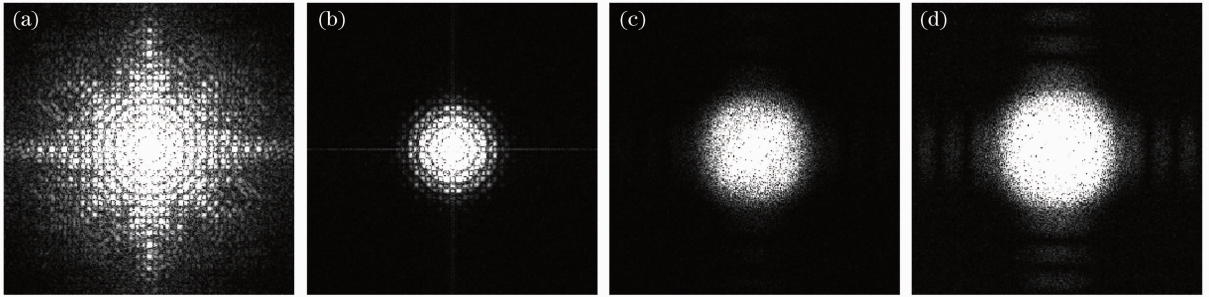


图 6 实验二频谱图。(a)原始频谱;(b)MMV 模拟频谱;(c)MAP 频谱;(d)本文频谱

Fig. 6 Frequency spectrum of Experiment two. (a) Origin spectrum; (b) simulation MMV spectrum; (c) MAP spectrum; (d) article spectrum

表 1 峰值信噪比的比较

Table 1 Comparison of PSNR

σ	Method	Plane	Tank	Car	σ	Method	Plane	Tank	Car
0.05	Degraded	32.8625	30.9220	30.7075	0.5	Degraded	17.7283	17.6165	17.7757
	Wiener	41.1858	41.3244	43.6482		Wiener	26.6309	29.2007	31.8964
	MAP	42.1504	37.3986	40.0087		MAP	30.8063	30.9539	33.6765
	Article	43.8449	38.3094	40.8422		Article	35.4218	34.8686	37.0140
0.2	Degraded	22.5219	21.6753	21.6051	0.8	Degraded	16.0280	16.1671	16.4511
	Wiener	31.7741	33.5468	36.0159		Wiener	24.7147	27.4122	30.2961
	MAP	36.6143	34.6009	36.9738		MAP	28.0047	29.0849	31.4375
	Article	40.7702	37.1437	39.1131		Article	33.5871	33.4260	35.2090

6 结 论

将维纳滤波中的 K 值改进为自适应的,能充分利用图像原有信息来恢复,并结合维纳滤波能恢复频谱分量的优点和正则 MAP 外推高频分量的优点,提出了一种新的自适应无源毫米波成像超分辨率处理方法。新算法的处理结果更理想,去噪效果更好,信噪比高,并且算法的收敛速度很快,一般在 10 次以内就能达到收敛的效果。为了验证算法的有效性,分别用了模拟毫米波图像和真实的毫米波图像进行处理,实验结果表明了论文方法的有效性,其效果也比传统方法更好。

参 考 文 献

- 1 S. E. Clark, J. A. Loveberg, C. A. Martin. Passive millimeter-wave imaging for airborne and security applications[C]. *SPIE*, 2003, **5077**:16~22
- 2 Nie Jianying, Li Xingguo, Lou Guowei. Estimates of the target's brightness temperature in millimeter wave radiometric measurements[J]. *J. Microwaves*, 2003, **19**(2): 24~27
聂建英, 李兴国, 娄国伟. 毫米波辐射探测目标亮温的估计[J]. *微波学报*, 2003, **19**(2): 24~27
- 3 Xia Jigang, Tang Yan. Theory modeling, simulation and analysis on millimeter wave holographic imaging radar based on point scanning mode[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(11): 110701
夏继钢, 汤 燕. 逐点扫描毫米波全息成像雷达的建模仿真分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(11): 110701
- 4 Cheng Ping, Zhao Jiaqun, Si Xicai *et al.*. L-R imaging algorithm for passive millimeter wave based on sparse representation [J]. *J. Electronics & Information Technology*, 2010, **32**(7): 1707~1711

- 成 萍, 赵家群, 司锡才 等. 基于稀疏表示的被动毫米波 L-R 成像算法[J]. 电子与信息学报, 2010, **32**(7): 1707~1711
- 5 Zhou Bo, Jiang Yuesong, Tang Hua *et al.*. A super-resolution algorithm based on modified approach of Keren registration method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(5): 051006
- 周 波, 江月松, 唐 华 等. 基于改进 Keren 配准方法的超分辨率算法[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(5): 051006
- 6 Hu Fei, Yu Wenjuan. A super-resolution reconstruction algorithm of passive millimeter-wave image[J]. *J. Microwaves*, 2009, **25**(1): 79~82
- 胡 飞, 俞文娟. 一种无源毫米波成像超分辨率算法[J]. 微波学报, 2009, **25**(1): 79~82
- 7 Jin Xin, Xiong Jintao, Li Liangchao *et al.*. Projected wavelet-domain MAP estimation super-resolution algorithm for passive millimeter wave imaging[J]. *J. Electronics & Information Technology*, 2010, **32**(4): 389~393
- 金 鑫, 熊金涛, 李良超 等. 投影小波域 MAP 估计无源毫米波图像超分辨率算法[J]. 电子与信息学报, 2010, **32**(4): 389~393
- 8 Liu Yang, Cui Jiwen. Image restoration based on hybrid Wiener/projection onto convex sets algorithm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 789~794
- 刘 洋, 崔继文. 维纳/投影限制集混合算法实现超分辨率图像复原[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 789~794
- 9 Bai Junqi, Chen Qian, Wang Xianya. An improved high-resolution reconstruction algorithm for staring infrared image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 86~90
- 白俊奇, 陈 钱, 王娴雅. 一种改进的凝视红外图像高分辨率重建算法[J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 86~90
- 10 B. R. Hunt, P. Sementilli. Description of a Poisson imagery super resolution algorithm[C]. *Astronomical Data Analysis Software and Systems*, 1992, **25**: 196~199
- 11 Zhang Hongmin, Chen Xinping, Zhang Yajuan. Improved Wiener filter algorithm for image restoration[J]. *J. Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2010, **24**(7): 76~80
- 张红民, 陈建新, 张亚娟. 一种改进的 Wiener 滤波图像复原算法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2010, **24**(7): 76~80
- 12 Zhang Lei, Yang Jianfeng, Xue Bin *et al.*. Modified MAP algorithm for single frame super-resolution reconstruction[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(1): 011003
- 张 磊, 杨建峰, 薛 彬 等. 改进的最大后验概率估计法实现单幅图像超分辨率重建[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(1): 011003
- 13 Shen Huanfeng, Li Pingxiang, Zhang Liangpei. Adaptive regularized MAP super-resolution reconstruction method[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, **31**(4): 949~95
- 沈焕锋, 李平湘, 张良培. 一种自适应正则 MAP 超分辨率重建方法[J]. 武汉大学学报, 2006, **31**(4): 949~95